
Influencia del espesor de la junta de mortero en muros de ladrillo sometidos a esfuerzos de compresión

MJ Casati^{1*}, S Monteagudo², J C Gálvez³, G Al-Assadi⁴

¹ Departamento de Vehículos Aeroespaciales, E.U.I.T Aeronáutica, Universidad Politécnica de Madrid, e-mail: mariajesus.casati@upm.es.

² Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, e-mail: sm.monteagudo@gmail.com.

³ Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, e-mail: jaime.galvez@gmail.com.

⁴ Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, e-mail: ghalasadi@yahoo.es.

RESUMEN

En este trabajo se analiza la influencia del espesor de la junta de mortero en la resistencia a compresión de la fábrica de ladrillo cerámico bajo esfuerzos de compresión uniaxial. Además se estudia el progresivo agrietamiento del material durante el proceso de carga. Se han ensayado nueve muros y nueve pilares, combinando tres espesores de junta de mortero realizando medidas con ultrasonidos, además se han realizado medidas con extensómetros y esclerómetro. Los resultados obtenidos muestran que a menor espesor de junta mayor carga de rotura y mayor valor de la velocidad de pulso ultrasónico. La medida con ultrasonidos muestra una buena correlación con las medidas extensométricas y permite una eficaz detección del agrietamiento interior del material durante el proceso de rotura.

Palabras clave: Fábrica, ladrillo cerámico, compresión uniaxial, ultrasonidos, ensayos no destructivos.

ABSTRACT

The aim of this paper is to analyze the influence of the mortar joint thickness on the structural behavior of brick-masonry specimens under compressive stress. Nine walls and nine columns were tested, combining three mortar joint thicknesses. To evaluate the progressive cracking of the material during the loading process, ultrasonic, extensometer and Schmidt impact tester measurements have been performed. Results show that the thinner the mortar joint, the greater the breaking loads. Ultrasound measurement shows a good correlation with the extensometer measures and allows an accurate detection of cracking inside the material during the breaking process.

Keywords: Masonry, clay brick, compression stress, ultrasounds, non destructive tests.

Autor de contacto: MJ. Casati

1. INTRODUCCIÓN

La fábrica de ladrillo cerámico se ha empleado desde la antigüedad y tiene una gran tradición en nuestro país. Aún así, el estudio de su comportamiento estructural y resistencia sigue centrando el interés de los investigadores (Mohammed, 2010, Reyes et al., 2008, Reyes et al., 2009). Parte de este interés responde a la necesidad de evaluar la capacidad portante de estructuras históricas como puentes y edificios. La recuperación de edificios históricos, así como el cambio de uso de otros bien conservados, requiere evaluar su resistencia para establecer el posible refuerzo o reparación en función de las solicitudes de uso. La fábrica de ladrillo es un material heterogéneo y anisótropo constituido por ladrillos y mortero. Su comportamiento hasta rotura es no-lineal y depende fundamentalmente de sus componentes (ladrillo, mortero y junta ladrillo-mortero), así como de la disposición constructiva (aparejo y espesor de la junta). Los modelos de cálculo de la resistencia de la fábrica disponibles conducen a valores muy diferentes y en algunos casos no contemplan aspectos importantes como el espesor de junta (Monteagudo, 2010).

La intervención sobre el Patrimonio Cultural Inmueble debe ser lo menos agresiva posible (Lombillo, 2007), siendo el uso de ensayos no destructivos una vía muy adecuada para conocer las propiedades de la fábrica. La medida de la velocidad de los pulsos ultrasónicos (VPU) se ha empleado con éxito en ladrillos (Koroth et al., 1998), en fábrica de piedra (Vasconcelos et al., 2008) y combinada con termografía (Meola et al., 2005). Sin embargo hay pocos resultados experimentales acerca de cómo afecta el distinto espesor de las juntas de mortero en la fábrica de ladrillo.

En este trabajo se analiza la influencia del espesor de la junta de mortero en el comportamiento estructural de probetas de fábrica de ladrillo cerámico bajo esfuerzos de compresión uniaxial. Para su estudio se han ensayado nueve muros y nueve pilares, combinando tres espesores de junta de mortero, sometidos a carga de compresión hasta rotura. Con el fin de evaluar simultáneamente el progresivo agrietamiento del material durante el proceso de carga, se han realizado también medidas con ultrasonidos. Además se han realizado medidas con extensómetros y esclerómetro para contrastar la validez de las medidas de ultrasonidos.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se han ensayado pilares y muros de fábrica de ladrillo, con tres espesores de junta, de 5, 10 y 15 mm, respectivamente. Se han ensayado tres probetas de cada espesor. La dimensión de los pilares fue de 235x235x800 mm. Los muros tenían una planta de 750x115 mm y altura entre 650-830 mm. La nomenclatura utilizada para designar a las probetas se muestra en la Tabla 1.

2.1 Ladrillos

Para la fabricación de las probetas se han empleado ladrillos comerciales cerámicos macizos de dimensiones 235x108x37 mm. Su resistencia a compresión uniaxial, medida según UNE-EN 772-1 (UNE, 2002) sobre tres probetas con dimensiones 40x40x40 mm, fue de 60 MPa.

Tabla 1: Nomenclatura y dimensiones de las probetas ensayadas.

Junta (mm)	Nombre de la probeta		
Pilares			
5	P 1.05	P 2.05	P 3.05
10	P 1.10	P 2.10	P 3.10
15	P 1.15	P 2.15	P 3.15
Muros			
5	M 1.05	M 2.05	M 3.05
10	M 1.10	M 2.10	M 3.10
15	M 1.15	M 2.15	M 3.15

2.2 Mortero

El mortero empleado estaba compuesto por cemento Portland CEM I 42,5 N y arena silícea normalizada con un tamaño máximo de árido de 1,5 mm. La relación agua/cemento fue 0,5. La relación cemento:arena 1:6. La resistencia a compresión del mortero, según la norma UNE-EN 1015-11 (2007), medida sobre tres probetas con dimensiones 35x35x35 mm, fue de 22,9 MPa.

2.3 Construcción de los pilares y muros

Los ladrillos se sumergieron en agua una hora antes de emplearlos en la fabricación de las probetas con el fin de evitar la absorción del agua del mortero por parte del ladrillo, lo que podría causar una mala adhesión en la interfaz ladrillo-mortero. Los muros y los pilares se confeccionaron con tres espesores de junta 5, 10 y 15 mm. Las caras superior e inferior de las probetas estaban rematadas con una capa de mortero de 20 mm de espesor. La superficie de apoyo se refrentó con una capa de azufre.

2.4 Procedimiento de ensayo de las probetas

Los muros y los pilares se ensayaron a compresión uniaxial de acuerdo a la norma UNE-EN 1052-1 (1999). El ensayo se realizó con una máquina servohidráulica de 2000 kN de capacidad, con control de desplazamiento. Para la aplicación de la carga y la correcta distribución de la misma en los pilares se aplicó intercalando un tablero de aglomerado de 1cm de espesor entre el plato de la máquina y la probeta. En el caso de los muros se empleó una viga metálica de reparto HEB250 con rigidizadores para distribuir la carga uniformemente. La carga se aplicó en escalones de 150 kN, con estabilización de la deformación en cada escalón. La Figura 1.a muestra un esquema de las dimensiones de las probetas y de la aplicación de la carga en los pilares y los muros.

El acortamiento de las probetas durante el ensayo se midió con extensómetros inductivos (tipo LVDT) de 40 mm de recorrido. En los pilares se emplearon dos adosados en caras opuestas, mientras que en los muros fueron cuatro, dos en cada pareja de caras opuestas (véase Figura 1.b).

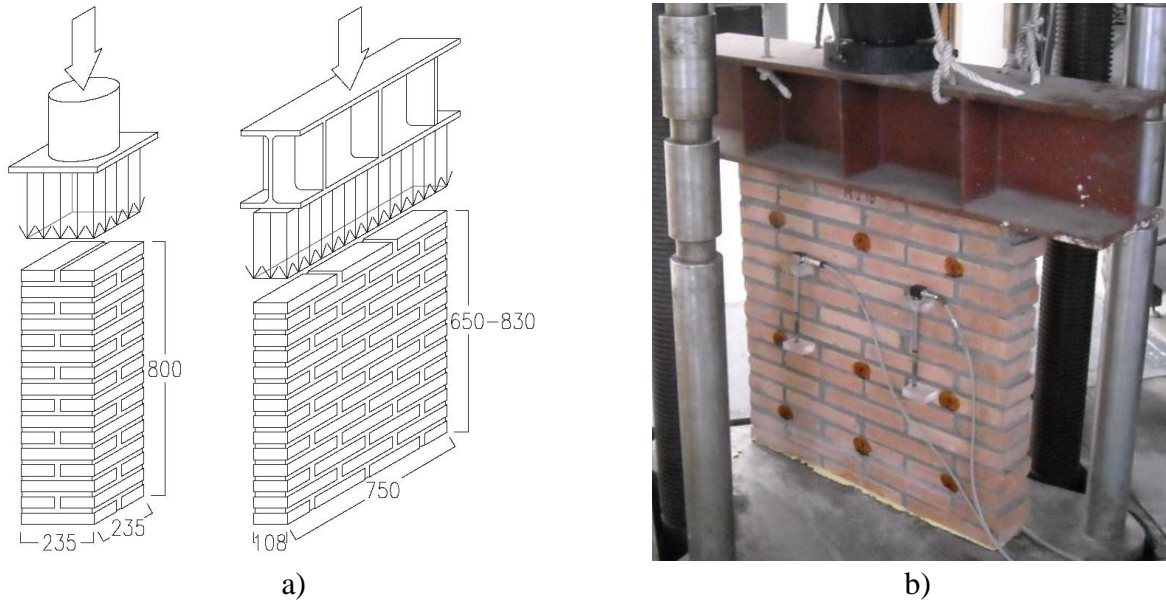


Figura 1: a) Esquema de carga y dimensiones de pilares y muros (cotas en mm) y
b) Ensayo de compresión de un muro.

La medida de la VPU se hizo con un equipo PUNDIT con transductores de alta frecuencia (50-100 kHz). En el caso de los pilares la VPU se midió de forma directa en dos direcciones (véase Figura 2.a). En la *posición 1* el tren de ondas atraviesa ladrillo y mortero (L+M), y en la *posición 2* solo ladrillo (L). Estas medidas se realizaron en las dos direcciones X e Y del plano de medida. En los muros, la medida se realizó a través del ladrillo sin atravesar el mortero (Figura 2.b). Las medidas se realizaron en tres alturas diferentes tanto en los pilares como en los muros.

Además, se empleó un esclerómetro para determinar la variación de la dureza superficial del ladrillo y del mortero durante la carga de los pilares. Se tomaron seis medidas a diferentes alturas.

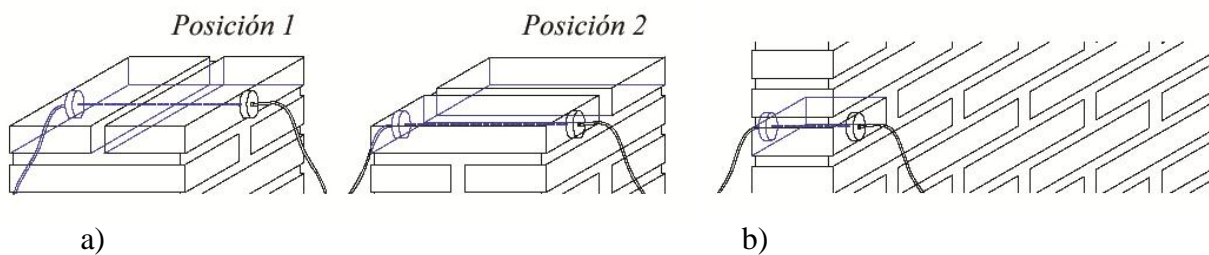


Figura 2: Esquema de posición de transductores en la medida de VPU, a) en pilares y b) en muros.

3. RESULTADOS

La Figura 3.a muestra la VPU en los pilares en función de la carga aplicada para las dos posiciones de medida. El promedio de VPU obtenida en la *posición 1* (L+M) fue de 3.863,2 m/s,

mientras que en la *posición 2* (L) fue de 4.236,5 m/s. La Figura 3.b muestra la VPU en los muros en función de la carga aplicada.

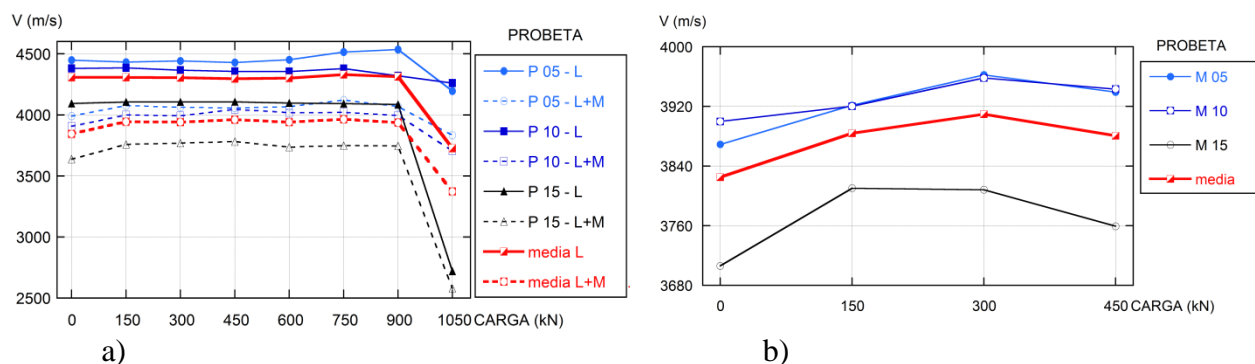


Figura 3: VPU en función de la carga, a) en pilares y b) en muros.

La Figura 4.a compara en cada escalón de carga la VPU para cada espesor de junta de mortero en los pilares. La Figura 4.b muestra análogos resultados para los muros.

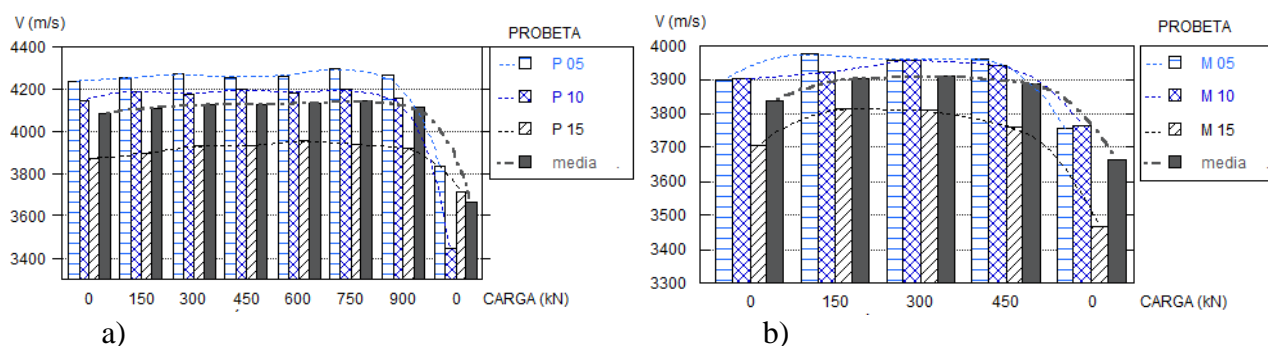


Figura 4: VPU para cada espesor de junta en función de la carga, a) en pilares y b) en muros.

La Tabla 2 muestra las tensiones de rotura para los pilares y los muros. Los valores individuales para cada espesor de junta corresponden al valor medio de las tres probetas ensayadas.

Tabla 2: Tensión de rotura de las probetas ensayadas.

Probeta	Junta (mm)	Tensión de rotura (MPa)	
		Individual	Media
Pilares	5	20,5	19,5
	10	19,1	
	15	19,0	
Muros	5	10,4	7,8
	10	7,7	
	15	5,3	

La Figura 5.a muestran la VPU medida en los pilares para las dos posiciones 1(L) y 2(L+M) y la Figura 5.b la medida sobre los muros, en función de la altura, antes, durante y después del ensayo. En ambas figuras se presentan los valores correspondientes al espesor de junta de 5 mm.

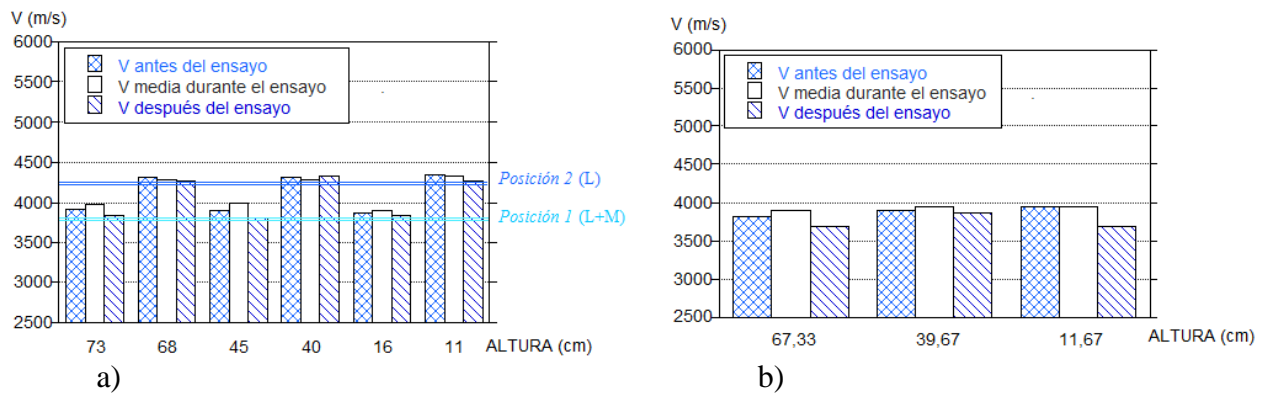


Figura 5: VPU en función de la altura, a) Pilar P 05 - Dirección del eje X y b) Muro M 05.

La Figura 6 muestra el índice de rebote medido en los ladrillos y el mortero de los pilares en los distintos escalones de carga.

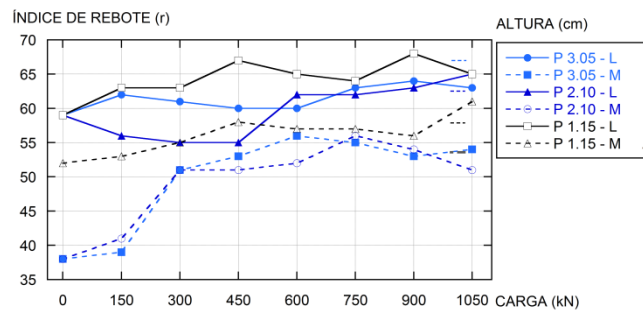


Figura 6: Índice de rebote medido en los ladrillos y el mortero de los pilares.

Las Figuras 7.a y 7.b muestran las curvas tensión deformación medidas con los extensómetros, en los pilares y los muros respectivamente.

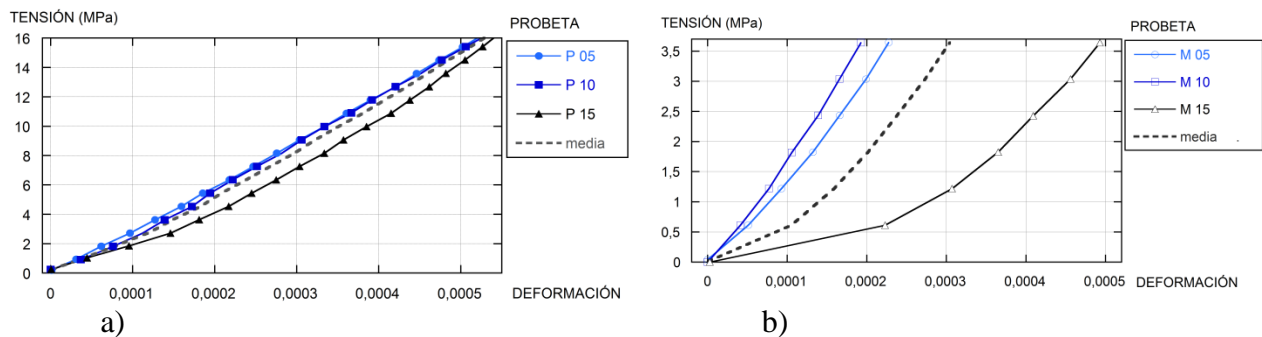


Figura 7. Curvas tensión-deformación, a) en pilares y b) en muros.

Tabla 3: Valores promedio de la tensión característica obtenida mediante expresiones analíticas.

Norma	Resistencia característica a compresión (MPa)	
EC-6	$f_k = K f_b^{0,65} f_m^{0,25}$ $K = 0,60$	$f_k = 18,16 \text{ MPa}$
CTE	$f_m < 20 \text{ MPa}$ $f_m < 2 \cdot f_b$	
NBE FL-90	$f_k = f - 1,64\delta$ $\delta = \sqrt{\frac{\sum(f_j - f)^2}{n - 1}}$	$f_{k \text{ PILARES}} = 18,66 \text{ MPa}$ $f_{k \text{ MUROS}} = 5,15 \text{ MPa}$

4. DISCUSIÓN

La VPU es claramente inferior cuando el pulso atraviesa el ladrillo y mortero, es el caso de los pilares con medida de VPU en *posición 1* (véase Figura 3.a). La razón se debe a la menor rigidez del mortero y a la presencia de la discontinuidad ladrillo-mortero. Este fenómeno ha sido observado por otros autores (Koroth et al., 1998), (Schuller et al., 1997). En los pilares y en los muros se observa una relación clara entre la VPU y el espesor de la junta de mortero en todos los escalones de carga (véanse Figuras 4.a y 4.b). La VPU es mayor en los pilares con una junta de mortero de menor espesor. Este efecto se debe a que el mortero es más deformable que el ladrillo.

Tanto los pilares como los muros muestran un ligero aumento en la VPU antes de alcanzar la carga de rotura. Este aumento se debe a la mayor compactación del material que reduce el volumen de los huecos. Tras la descarga, después de superar la carga máxima, la aparición de grietas se evidencia por una fuerte disminución de la VPU (Figuras 4.a y 4.b). Meglis et al. (Meglis, 2005), entre otros, también observaron la disminución de la VPU a medida que las grietas se propagaban. La medida de VPU a distintas alturas (Figuras 5.a y 5.b) muestra variaciones muy pequeñas, aspecto que confirma una distribución uniforme de la carga en el elemento.

El índice de rebote es mayor en el ladrillo que en el mortero, lo que era de esperar, ya que la rigidez del ladrillo es mayor que la del mortero, propiedad que se manifiesta en la dureza superficial. Se observa una tendencia a aumentar el índice de rebote a medida que aumenta la carga debido a que el material gana compacidad. Este aumento es más pronunciado en el mortero que en el ladrillo por ser el mortero un material más deformable. Los resultados de la evaluación de la dureza superficial confirman las conclusiones obtenidas al medir la VPU como se observa en la Figura 6.

Las curvas tensión-deformación de los pilares (Figura 7.a) muestran una baja dispersión experimental y confirman una mayor deformabilidad en los pilares con mayor espesor de junta de mortero. En el caso de los muros (Figura 7.b) el resultado es análogo, si bien hay una mayor dispersión experimental achacable a la mayor esbeltez de los muros (Carpinteri et al, 2007).

Respecto a la resistencia media experimental de las probetas, en la Tabla 2 se observa, especialmente en los muros, un incremento de la resistencia a medida que disminuye el espesor de la junta de mortero. La Tabla 3 compara los resultados obtenidos con la resistencia propuesta por Euro Código 6 (EN-1996-1-1), el Código Técnico de la Edificación (CTE) y la Norma Básica de la Edificación de Fábricas de Ladrillo (NBE FL-90) para los pilares. Los valores obtenidos analíticamente mediante EC-6 y CTE calculan la resistencia característica a compresión en base resistencia a compresión de los materiales constituyentes y ofrecen valores parecidos a la media experimental obtenida en los pilares. La NBE FL-90 está derogada, pero se incluye en la comparación porque muchos de los elementos de fábrica actualmente en servicio se han calculado de acuerdo a sus prescripciones. La menor capacidad portante de los muros respecto a los pilares se debe a la mayor esbeltez, que a pesar de las precauciones tomadas, puede inducir excentricidad en la carga. Carpinteri et al. (Carpinteri et al, 2007) han comprobado con probetas a escala que la tensión de rotura es una función decreciente de la esbeltez.

5. CONCLUSIONES

Las conclusiones que pueden extraerse de esta investigación, aparte de los resultados ya comentados, son las siguientes:

- Los métodos de evaluación no destructiva utilizados durante la campaña experimental ofrecen resultados fiables sobre las propiedades de la fábrica, su deterioro y su estado de carga. La medida de la VPU, complementada con el martillo Schmidt (esclerómetro), es un método útil para estimar el estado de la fábrica, sin necesidad de dañar el material existente. Con la adecuada calibración, el método ultrasónico puede ser muy útil en la evaluación estructural, especialmente para detectar las zonas más dañadas o agrietadas que a veces no son apreciables en una inspección visual.
- Los resultados obtenidos muestran, como cabía esperar, que existe una relación directa entre el espesor de la junta de mortero y la capacidad portante de la fábrica durante el ensayo de compresión uniaxial. Además, cuanto menor es el espesor de la junta, mayor es la VPU registrada.
- La resistencia a compresión de los materiales constituyentes de la fábrica condicionan la resistencia de la fábrica, sin embargo, por sí mismos no permiten establecer conclusiones definitivas sobre la resistencia a compresión de la fábrica. Los modelos de la normativa vigente establecen la tensión de rotura en función de la resistencia de los materiales constitutivos, sin embargo aspectos como el espesor de la junta de mortero, son cruciales en el comportamiento no lineal del conjunto de la fábrica.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Ciencia e Innovación la concesión de los proyectos DPI2011-24876 e IPT-42000-2010-3.

7. BIBLIOGRAFÍA

Carpinteri A., Lacidogna G. (2007), *Damage evaluation of three masonry towers by acoustic emission*, Elsevier, Engineering Structures Vol. 29, pp. 1569–1579.

Lombillo I. et al. (2008), *Evaluación no destructiva del patrimonio construido*, Revista Internacional Construlink, 16 Vol. 6, pp. 40-53.

Meglis I.L., Chow T., Martin C.D., Young R.P. (2005), *Assessing in situ microcrack damage using ultrasonic velocity tomography*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, No. 42, Vol. 1, pp. 25–34.

Meola, C. et al. (2005), *Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures*, Elsevier, Engineering Failure Analysis Vol. 12, pp. 875–892.

Mohammed A., Hughes T.G., Mustapha A. (2011), *The effect of scale on the structural behavior of masonry under compression*, Construction and Building Materials 25, pp. 303-307.

Monteagudo S. (2010), *Análisis estructural de muros de fábrica mediante ensayos no destructivos*, Proyecto Fin Máster, E.T.S. Ingenieros Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica Madrid.

Reyes E., Casati M.J., Gálvez J.C. (2008), *Cohesive crack model for mixed mode fracture of brick masonry*, Int. J. of Fracture 151, pp. 29-55.

Reyes E. et al. (2009), *An embedded cohesive crack model for finite element analysis of brickwork masonry*, Eng. Fract. Mech. 76, pp. 1930-1944.

Koroth S.R., Fazio P., Feldman D. (1998), *Evaluation of clay brick durability using ultrasonic pulse velocity*, Journal of architectural engineering 4, pp. 142-147.

Schuller M., Berra M., Atkinson R., Binda, L. (1997), *Acoustic tomography for evaluation of unreinforced masonry*, Elsevier, Construction and Building Materials, Vol. 11, No. 3, pp. 199-204.

UNE-EN 772-1 (2002), *Métodos de ensayo para piezas de fábrica. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión*.

UNE-EN 1015-11 (2007), *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido*.

UNE-EN 1052-1 (1999), *Métodos de ensayo para albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión*.

Vasconcelos, G. et al., (2008), *Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granite*, Elsevier, Ultrasonics, Vol. 48, pp. 453–466.